

**IMPLEMENTACIÓN DE AHORRO ENERGÉTICO EN MOTORES AC POR MEDIO
DE ARRANCADORES SUAVES Y VARIADORES DE VELOCIDAD**

**CRISTIAN FELIPE ESCOBAR BETANCUR
IVÁN FERNANDO GARNICA PALENCIA
SEBASTIÁN ROJAS CORREA**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2021**

**IMPLEMENTACIÓN DE AHORRO ENERGÉTICO EN MOTORES AC POR MEDIO
DE ARRANCADORES SUAVES Y VARIADORES DE VELOCIDAD**

**CRISTIAN FELIPE ESCOBAR BETANCUR
IVÁN FERNANDO GARNICA PALENCIA
SEBASTIÁN ROJAS CORREA**

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Eléctrica

Asesor Técnico:

**Ignacio Alberto Londoño Ossa
M.Sc. en Ingeniería**

Asesor Metodológico:

**Juan David Velásquez Gómez
M.Sc. en Gerencia de Proyectos**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2021**

Contenido

1 Planteamiento del Problema	6
1.1 Contexto energético nacional.....	6
1.2 Descripción	7
1.3 Formulación	9
2 Justificación	10
3 Objetivos.....	11
3.1 Objetivo general.....	11
3.2 Objetivos específicos	11
4 Marco Teórico.....	12
4.1 Demanda energética en Colombia	12
4.2 Motor AC	13
4.3 Problemas más comunes en los motores trifásicos de inducción	14
4.3.1 Alteraciones en el suministro eléctrico	14
4.3.2 Trabajo mecánico asociado al motor	14
4.4 Variadores de Velocidad.....	15
4.4.1 Características de un variador de velocidad.....	16
4.4.2 Funcionamiento.....	16
4.5 Arrancadores suaves	17
4.6 ¿Arrancador suave o variador de frecuencia?.....	18
4.7 Marco legal	19
4.7.1 Norma IEC 60034-30 – Normativa eficiencia energética.....	19
4.7.2 Artículo 12. Motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla para 60 Hz .	21
4.7.2.1 Eficiencias mínimas para comercialización.....	21
5 Metodología	26
5.1 Tipo de Proyecto.....	26
5.1.1 Investigación descriptiva y aplicada.	26
5.1.2 Método	26
5.2 Instrumentos de recolección de información	27
5.2.1 Fuentes primarias	27

5.2.2	Fuentes secundarias.....	27
6	Resultados del proyecto.....	28
6.1	Lugar de la primera prueba: Yarumal, Antioquia.....	28
6.1.1	Equipos requeridos para la prueba.....	29
6.1.2	Procedimiento.....	31
6.2	Lugar de la segunda prueba: Envigado, Antioquia.....	33
6.2.1	Equipos para prueba.....	35
6.2.2	Procedimiento.....	36
6.2.2.1	Arranque directo.....	36
6.2.2.2	Arranque estrella delta.....	38
6.3	Publicación de resultados.....	39
7	Conclusiones.....	40
8	Recomendaciones.....	42
9	Referencias Bibliográficas.....	43
10	Anexos.....	45

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia</i>	8
Tabla 2. <i>Métodos principales para el arranque suave para un motor trifásico</i>	18
Tabla 3. <i>Límite inferior nominal para Eficiencia Super Premium (IE4) (%) 60Hz</i>	21
Tabla 4. <i>Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE3) (%) 60Hz</i>	22
Tabla 5. <i>Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE2) (%) 60Hz</i>	23
Tabla 6. <i>Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE1) (%) 60Hz</i>	25
Tabla 7. <i>Consumo en arranque directo por cada valor RMS</i>	32
Tabla 8. <i>Consumo en arranque con variador de frecuencia por cada valor RMS</i>	33
Tabla 9. <i>Corriente en el arranque directo, tomada en función del tiempo.</i>	37
Tabla 10. <i>Corriente en el arranque estrella delta, tomada en función del tiempo.</i>	38

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Participación de usos de la energía en sector industrial – 2014.....	6
<i>Figura 2.</i> Partes de un motor AC.....	13
<i>Figura 3.</i> Sistema de conexión para un variador de velocidad.....	17
<i>Figura 4.</i> Placa de características molino de piedras.....	28
<i>Figura 5.</i> Caja de conexión molino de piedra.....	29
<i>Figura 6.</i> Acople molino de piedras	29
<i>Figura 7.</i> Estructura exterior variador de frecuencia Yaskawa	30
<i>Figura 8.</i> Tablero de control variador de frecuencia Yaskawa	30
<i>Figura 9.</i> Picos de corriente en sistema de operación en arranque directo.....	31
<i>Figura 10.</i> Picos de corriente en sistema de operación en arranque con variador de frecuencia .	32
<i>Figura 11.</i> Placa de características de la maquina extrusora	34
<i>Figura 12.</i> Motor tornillo Sin fin 1	34
<i>Figura 13.</i> Motor tornillo Sin fin 2.....	35
<i>Figura 14.</i> Equipo de medida pinza amperimétrica Unit UT 203	35
<i>Figura 15.</i> Arrancador estrella – delta del motor.	36
<i>Figura 16.</i> Grafica del arranque directo corriente vs tiempo.....	37
<i>Figura 17.</i> Grafica del arranque estrella delta corriente vs tiempo	38

Anexos

Anexo 1. Manual analizador de redes AEMC 3945	45
Anexo 2. Manual variador Yaskawa A1000.....	45
Anexo 3. Manual Multímetro digital UT203.....	45

Resumen

IMPLEMENTACIÓN DE AHORRO ENERGÉTICO EN MOTORES AC POR MEDIO DE ARRANCADORES SUAVES Y VARIADORES DE VELOCIDAD

CRISTIAN FELIPE ESCOBAR BETANCUR
IVÁN FERNANDO GARNICA PALENCIA
SEBASTIÁN ROJAS CORREA

Las empresas están requiriendo mejorar su competitividad y ser más eficientes, este documento divulga una propuesta para el arranque de los motores de corriente alterna basados en variadores de frecuencia y arrancadores con conexión estrella triángulo, donde se materializa una medida de ahorro energética y se protege a los equipos de estrés mecánico, maximizando los ciclos de mantenimiento y vida útil de los motores

La investigación se planteó con un enfoque cuantitativo y alcance descriptivo, mediante el cual la recolección de medidas a través de pruebas realizadas, ayuda a resolver un problema de la industria.

Finalmente, se concluye que implementar sistemas de ahorro

Palabras claves: Motor AC, variador de frecuencia, arrancador estrella delta, ahorro energético, corriente alterna

Abstract

Companies are requiring improving their competitiveness and be more efficient, this document discloses a proposal for starting alternating current motors based on frequency inverters and starters with star-delta connection, where an energy saving measure is materialized and protects mechanical stress equipment, maximizing maintenance cycles and engine life

The research was carried out with a quantitative approach and descriptive scope, whereby the collection of measurements through tests carried out helps to solve an industry problem.

Finally, it is concluded that implementing energy saving systems to reduce the electric starting current in the motors, reduces costs and prolongs the useful life of the motor.

Keywords: Ac motor, frequency inverter, star-delta starting, energy saving, alternating current

Glosario

Analizador de red: Es un dispositivo multifunción que mide con precisión la corriente alterna, corriente continua y la potencia en la red eléctrica.

Arrancador estrella-delta: Es un conjunto de contactores conectados entre sí, cuya función es suavizar el arranque de un motor, disminuyendo la corriente de arranque.

Corriente: Flujo de electrones a través de un conductor. Su intensidad se mide en amperios (A).

Corriente alterna: Corriente eléctrica cuya intensidad toma valores positivos y negativos en el tiempo que se considere. O corriente cuya intensidad es función sinusoidal del tiempo.

Corriente de arranque: Es la corriente eléctrica necesaria que emplea el motor para iniciar su operación.

Motor AC: Es un motor eléctrico que funciona con corriente alterna, que transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación o par por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

Variador de frecuencia: Dispositivo electrónico cuya función es regular la velocidad de los motores eléctricos para que la corriente que llega al motor se ajuste a la demanda real de la operación, reduciendo consumo de energía de la máquina.

Introducción

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en movimiento y se encuentran en todas partes en hogares, oficinas, edificios y fábricas. Sin embargo, los motores no convierten toda la energía eléctrica en energía mecánica utilizable, ya que parte de ella se pierde en forma de calor durante el proceso de conversión.

A nivel del sistema del motor, las pérdidas de energía son mucho mayores debido a ineficiencias adicionales en los componentes mecánicos e hidráulicos, y si a esto se le suma que las reparaciones de motores se realizan de forma no profesional, son una fuente de pérdidas de energía adicionales. Por esta razón es imprescindible el establecimiento de medidas y políticas adecuadas que puedan impulsar a los mercados a adoptar estándares de rendimiento sólidos, promover prácticas profesionales de reparación y fomentar mejoras de eficiencia en los sistemas generales que son impulsados por motores.

El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica que se seguirá en un proyecto de investigación, en el que se explorará la posibilidad de ahorrar energía en los sistemas de accionamiento de motores de corriente alterna por medio de variadores de velocidad y arrancador estrella-delta.

Se realizaron 2 pruebas con 2 tipos de arrancadores, la primera prueba se realizó con variador de frecuencia y la segunda prueba se realizó con arrancador estrella -delta, con el objetivo de analizar los consumos con los diferentes tipos de dispositivos de accionamiento de motores.

1 Planteamiento del Problema

1.1 Contexto energético nacional

En el año 2015, la energía útil y las pérdidas energéticas en el sistema interconectado nacional fue del 48 % y 52% respectivamente, representando costos de pérdidas al año cercanos a los 4.700 millones de dólares, lo cual muestra el potencial de Colombia para mejorar la eficiencia energética en los sectores productivos es significativa.

El sector industrial colombiano consume casi el 30 % de la energía final del país, estando detrás del sector de transporte que consume un 40% de la demanda nacional.

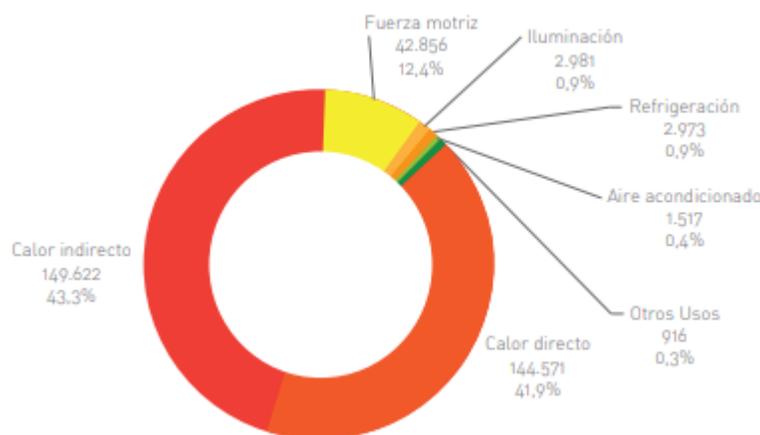


Figura 1. Participación de usos de la energía en sector industrial – 2014

Fuente: UPME, 2015

Dentro de la industria, se utiliza un 17% de energía eléctrica para uso final, el cual está distribuido en fuerza motriz (maquinaria) en un 76%, que incluye bombeo de agua, compresión de aire, entre otros.

Por esto se tiene una oportunidad y se hace necesario tomar medidas que ayuden a reducir estos consumos de energía y optimizar mejor los procesos industriales (Unidad de Planeación Minero Energética, 2016).

1.2 Descripción

Debido a que en la actualidad el sector industrial ha crecido a medida que el ser humano hace evolucionar nuevas tecnologías, se requiere un gran consumo de energía para poder mantenerse en funcionamiento. Una problemática constante es el uso ineficiente de la energía empleada en las industrias, donde los empresarios buscan cada vez máquinas más eficientes que permitan reducir su consumo.

Aunque el uso eficiente de la energía debiera ser un asunto prioritario para todos los sectores productivos, el foco está en el sector industrial, el cual tiene la más alta demanda de energía primaria y de este modo, el más alto potencial para el ahorro y conservación energética a través de medidas económicas y técnicas. Aunque estas medidas quizás requieran inversiones iniciales, los retornos pueden obtenerse en un corto plazo debido a la reducción en la demanda de energía. (Nuestra Esfera, 2014).

Altas pérdidas energéticas causadas por equipos o instalaciones obsoletas que no cumplen con los requisitos o estándares establecidas por el gobierno afectan así tanto el consumo eléctrico, económico y ambiental. Esto lleva a una demanda energética cada vez mayor, por lo cual siempre se está buscando nuevas formas de generación de electricidad, pero no de cómo controlar su consumo.

En los últimos años los estudios de motores AC han avanzado considerablemente, obteniendo resultados positivos frente al consumo eléctrico y funcionamiento. En el caso de la industria colombiana, la mayoría de las empresas optan por exportar tecnologías obsoletas europeas, en muchos casos estas máquinas no cumplen con la normatividad establecida en sus países de origen. En otras palabras, para el caso de Europa la norma solo permite vender motores IE3 en adelante, sin embargo, en Colombia hay una regulación específica al respecto que permite aún vender motores IE1 en adelante.

La eficiencia energética es un mecanismo que nos permite prolongar el abastecimiento energético del país, ya que se basa en la adopción de nuevas tecnologías y buenos hábitos de consumo, lo que permite aumentar la productividad en todos los sectores productivos del país.

Los sistemas de fuerza motriz representan más del 75 % del consumo energético del sector industrial en Colombia, viéndose fuertemente afectado por la antigüedad de fabricación y la carga de trabajo a la que están sometidos estos motores.

El promedio de edad de los motores eléctricos está en un promedio de los 20 años, en algunos casos se ha evidenciado funcionamiento de motores hasta los 50 años (UPME, 2016).

Tabla 1.

Sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia

Medidas	Potencial Aplicación	Potencial Eficiencia
Fuerza motriz		
Buenas prácticas en la compra, instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de fuerza motriz.	60%	10%
Sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia.	80%	15%
Instalación de variadores de velocidad o Drivers	50%	30%
Buenas prácticas en la operación y mantenimiento del sistema de aire comprimido	10%	30%
Impactos de las medidas		
• Impacto sobre energía eléctrica de sector industrial	5,51%	
• Impacto sobre energía total de sector industrial.	0,90%	
• Impacto sobre energía final país	0,25%	
• Impacto en consumo final (TJ).	23,313	
• Gases de efecto invernadero (kt CO ₂).	2,502	

Fuente. (UPME, 2016)

1.3 Formulación

El sector productivo en Colombia es el mayor consumidor de energía al consumir cerca del 80% del consumo según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ¿Es posible la implementación de un ahorro energético en motores AC por medio de arrancadores suaves y variadores de velocidad, para contribuir a la competitividad y economía de la industria colombiana y el cumplimiento del plan de acción indicativo PAI 2017-2022 para desarrollar el PROURE del Ministerio de Minas y Energía del país? (Universia, 2013).

2 Justificación

Con la aparición de nuevos conceptos en los procesos industriales sobre la velocidad, eficiencia, factor de potencia y requerimientos adicionales que cada proceso industrial demande, se aceleró el desarrollo y optimización de los diseños de máquinas eléctricas. Colombia está alineado con los compromisos de reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, y dentro de los grandes consumidores de energía a nivel nacional siempre se encuentra posicionada la industria.

Todos estos elementos y las diversas situaciones actuales en la industria conllevan a reflexionar y buscar soluciones a través de una serie de medidas de diversa naturaleza encadenadas temporal y espacialmente, como son: el ahorro y la mejora de la eficiencia de los sistemas eléctricos, especialmente en motores AC una mejor y más solidaria distribución de la energía final y la progresiva sustitución de las fuentes de energía convencionales.

Según el informe PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGIA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA, realizado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), para Julio de 2019, la demanda energética en el sector industrial representa el 32 % de la demanda energética nacional y proyecta para 2022 de un aumento de la demanda de este sector en un 4%, quedando así en 36 % (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019).

Estos temas son de ayuda para buscar implementar el uso eficiente de la energía ya que es una de las principales estrategias para mejorar la competitividad de la economía, además de beneficios económicos en la industria, debido a que como la mayoría de las empresas industriales manejan motores AC, se intenta disminuir el consumo que estas máquinas necesitan para su funcionamiento sin perder eficiencia.

3 Objetivos

A continuación, se puede encontrar el objetivo general y los objetivos específicos para el desarrollo del trabajo de grado.

3.1 Objetivo general

Evaluar métodos de ahorro energético eficiente en motores AC por medio de arrancadores suaves y variadores de velocidad, para la reducción en la corriente de arranque del tipo al inicio de operación de este tipo de máquinas.

3.2 Objetivos específicos

- Comparar el consumo de un motor AC, por medio de mediciones en el arranque de la máquina, evidenciando el beneficio de los dispositivos de arranque en la operación de estas.
- Implementar arrancadores y variadores de velocidad con motores trifásicos con carga mecánica, obteniendo datos de comparación con arranques directos.
- Evaluar los efectos de la reducción de la corriente de arranque y el estrés mecánico por medio de datos obtenidos en las pruebas para la comparación del ahorro energético y económico a largo plazo.
- Recomendar a nivel industria, el uso racional de la energía por medio recursos digitales públicos de divulgación de contenido, socializando las ventajas y desventajas en la utilización de arrancadores suaves y variadores de velocidad.

4 Marco Teórico

Los motores de inducción se han utilizado ampliamente en la industria, transforman la energía eléctrica en mecánica, los motores eléctricos en la actualidad consumen casi la mitad de la energía eléctrica generada, presentan una alta confiabilidad, fácil fabricación y alto nivel de eficiencia (Campos, y otros, 2021).

4.1 Demanda energética en Colombia

En un informe realizado por el periódico el Espectador de Colombia, se hace un análisis hecho por la firma Vértebra Soluciones que establece que, con la electricidad desperdiciada por las empresas colombianas en 2018, se generaría luz para 300.000 hogares durante un año, sectores económicos tan diversos como las finanzas, comercio, restaurantes, hoteles, servicios de entretenimiento y de salud lideran el ranking de segmentos de mercado que más gastan energía en Colombia (El espectador 2019).

En este informe también se argumenta que cada gran empresa de estas líneas de producción puede consumir entre 15 y 25 millones de kilovatios-hora al año, cifra equivalente a iluminar 35 hospitales durante 2019; y que la causa de este derroche es que muy pocos de estos negocios controlan de manera eficiente la temperatura de sus equipos, especialmente neveras, cuartos fríos en producción de alimentos o incluso aires acondicionados de los locales en los centros comerciales (El espectador 2019).

Por otro lado, si se habla de consumo energético es pertinente mencionar los motores eléctricos asincrónicos (MA). Este tipo de motores son máquinas eléctricas con aplicación en todos los sectores de la economía y consumen cerca del 50% de la energía eléctrica generada en el mundo. Fundamentalmente toman energía eléctrica de la red y la transforman en potencia mecánica para múltiples usos (Unidad de Planeacion Minero Energética, 2014).

4.2 Motor AC

Son motores que funcionan con alimentación de corriente alterna; este es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos magnéticos variables. Los motores eléctricos se componen en dos partes, una fija llamada estátor y una móvil llamada rotor. Funcionan generalmente bajo los principios del magnetismo y estos se clasifican según el número de fases, como lo son monofásicos, bifásicos y trifásicos, siendo estos últimos los más utilizados a nivel industrial (Monografias, 2021).

Los motores eléctricos se hallan formados por varios elementos, sin embargo, las partes principales son: el estátor, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes. No obstante, un motor puede funcionar solo con el estátor y el rotor (meia, 2021).

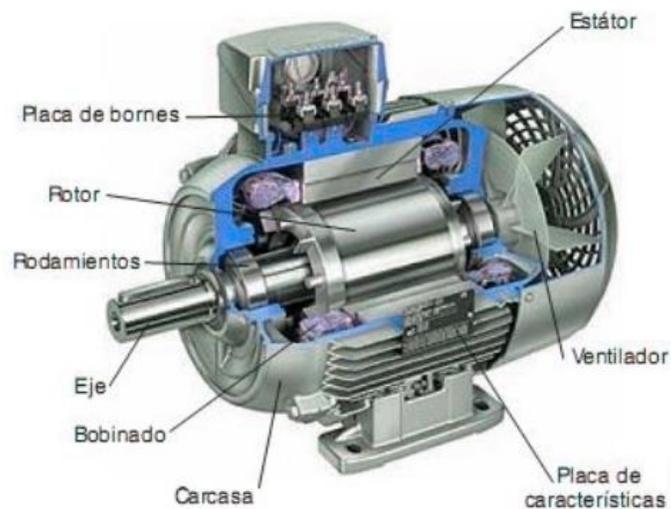


Figura 2. Partes de un motor AC

Fuente: (meia, 2021)

El mantenimiento preventivo de los motores de corriente alterna es muy importante ya que alarga la vida útil del motor y disminuye pérdidas y deformaciones de este.

La eficiencia (η) de un motor eléctrico es la medida (porcentaje) de su capacidad de convertir la potencia eléctrica que toma de la red en potencia mecánica útil. Las pérdidas corresponden a la

potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica. Por su naturaleza las pérdidas se agrupan en 5 áreas: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales (Schneider Electric, 2010).

4.3 Problemas más comunes en los motores trifásicos de inducción

Cuando un motor ingresa a un taller especializado para su reparación, debe ser examinado con cuidado en busca de la posible causa de la falla. No es fácil localizar con precisión tal causa, pues muchas veces su origen se oculta bajo devanados quemados u otras averías engañosas. Por ejemplo, los devanados pueden estar muy quemados, pero un examen detenido puede descubrir un cojinete dañado que ocasionó el rozamiento del motor contra el devanado del estator (Peralta, 2009).

Las principales causas se deben a alteraciones del suministro eléctrico, exceso de trabajo mecánico asociado y problemas en la instalación eléctrica que alimenta al motor.

4.3.1 Alteraciones en el suministro eléctrico

Cuando se habla de alteraciones en la fuente de tensión que alimenta el motor, nos referimos a la pérdida de una fase, inversión de secuencia y desbalance de voltaje, sea que se eleve mucho o que disminuya, todos estos factores dañan los motores, disminuyendo el tiempo de vida útil y colocando en riesgo la salud humana (EL BLOG DE MR ELECTROMECAÁNICA, 2010).

4.3.2 Trabajo mecánico asociado al motor

Cuando hablamos del trabajo mecánico, nos referimos para la naturaleza de su trabajo: bombeo de líquidos, ventilación, transporte de cargas, entre otros. En cada una de estas aplicaciones la máquina siempre consumirá potencia eléctrica para poder funcionar y este consumo aumentará o disminuirá dependiendo del esfuerzo al que sea sometido. Esta energía fluirá hacia el motor como corrientes de trabajo y estas varían, a mayor carga mayor corriente.

Todo motor, posee una corriente nominal de trabajo (I_n o RLA) que esta expresada en la placa del fabricante y al esfuerzo que sea capaz de desempeñar (HP). La corriente nominal (I_n o RLA), es la necesaria para que el motor realice el esfuerzo nominal (HP) especificado por el fabricante.

Si una maquina trabaja por encima de la corriente nominal de placa, se incrementará el calor en su devanado peligrosamente. Si este evento se extiende por un periodo de tiempo, el motor se calentará por encima de la temperatura máxima permitida, causando daños en el devanado de la máquina de manera irreversible. El devanado se va dañando, el aislante ya no es efectivo, haciendo contacto entre bobinas de diferentes fases, causando corto circuito interno y por ende, se quema la máquina (EL BLOG DE MR ELECTROMECAÁNICA, 2010).

4.4 Variadores de Velocidad

Los motores eléctricos en la industria, tienen dentro de sus funciones y responsabilidades, accionar la maquinaria a velocidades variables o constantes, con valores muy precisos. Sin embargo, las velocidades a las que trabajan los motores son constante o casi-constante y estos valores son determinados por el tipo de alimentación y de las características que posea el motor.

Si se pretende tener el control de esta velocidad, el dispositivo adecuado para esto se le conoce como variador de velocidad, los cuales también pueden ser utilizados para una amplia gama de aplicaciones dentro de la industria, como aires acondicionados, ventiladores, tornos o fresadoras.

Además del ahorro energético que los variadores proveen, también son accesibles y también son reconocidos dentro de los accionamientos para motores AC debido que dentro de los procesos de producción estos ofrecen una gran cantidad de ventajas, como aumento de la vida del motor, reducción de riesgo de daños en el motor durante el encendido y el apagado o la eliminación de componentes de accionamiento mecánico de altos precios (Iguren, 2015).

4.4.1 Características de un variador de velocidad

A continuación se presentan las principales características asociadas a los variadores de velocidad (Iguen, 2015).

- Aceleración regulada
- Control del par motor (torque).
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.

4.4.2 Funcionamiento

El variador de velocidad primero toma la señal de la alimentación de la red, rectifica la señal por medio de un puente de diodos, luego se conecta por medio de un bus AC al inversor, donde se genera la alimentación al motor de inducción (Iguen, 2017).

Este funcionamiento interno pasa por 3 etapas:

- Etapa rectificadora
- Etapa de enlazamiento y filtrado de la señal
- Etapa de inversión

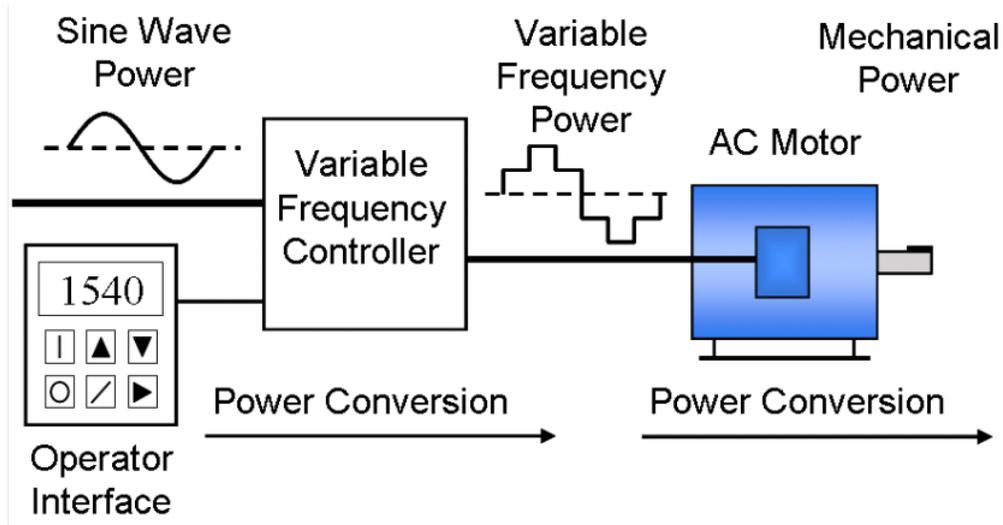


Figura 3. Sistema de conexión para un variador de velocidad

Fuente: (Iguen, 2017)

4.5 Arrancadores suaves

Es un elemento de característica electrónica que controla el arranque y parada de motores trifásicos de inducción, incluye corriente alterna y directa que ayudan a proteger la carga, en este caso motores o maquinaria y también ayuda a la reducción del consumo de energía para su funcionamiento. Para su aplicación, existen tres tipos de metodología para la utilización de estos dispositivos en un motor de inducción (Iguen, 2015):

Tabla 2.

Métodos principales para el arranque suave para un motor trifásico

Arranque Directo	Arranque Estrella - Delta	Arranque con Arrancador Suave
Ventajas	Ventajas	Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Menor costo económico que los motores en arranque directo • Mayor sencillez en el montaje que los motores en arranque directo • Mayor velocidad y par de arranque mejorado debido a la conexión directa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor costo económico • Mayor sencillez en montaje • Mayor velocidad y par de arranque mejorado debido a la conexión directa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se reduce el consumo de corriente a un tercio en la corriente de arranque • Bajo costo en equipos • Es un buen aliado para aplicaciones con poco par de arranque
Desventajas	Desventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor corriente de arranque, por lo cual mayor consumo de energía • Mayor desgaste mecánico del motor 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción en el par de arranque • Conexionado un poco más complejo debido al tipo de arranque 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción en el par de arranque • Conexionado un poco más complejo debido al tipo de arranque

Fuente: (Iguen, 2015)

4.6 ¿Arrancador suave o variador de frecuencia?

Para este proyecto se elige estos dos elementos debido a que son los más utilizados para la reducción del consumo energético a la cual queremos llegar en la investigación. La principal diferencia entre ambos es que con el arrancador suave no se puede controlar la velocidad del motor durante el funcionamiento normal. Un variador de frecuencia permite entre otras opciones regular la velocidad del motor en cualquier momento, no sólo en el arranque si no también al momento de parar.

- Cuando se necesita disminuir el pico de corriente únicamente en el arranque y parada, se utilizará un arrancador suave.
- Cuando es conveniente regular la velocidad del motor / ventilador / bomba en cualquier momento, se utilizará un variador de frecuencia.

4.7 Marco legal

El proyecto se trabaja dentro de la normativa vigente en Colombia la cual se basa en el reglamento técnico de etiquetado (RETIQ) artículo 12, el cual habla de motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla para 60 Hz. El objetivo de este artículo es comparar la eficiencia energética de motores de inducción entre los países de Latinoamérica y los países de las grandes economías a nivel internacional.

4.7.1 Norma IEC 60034-30 – Normativa eficiencia energética

La norma IEC 60034-30 define las nuevas clases de eficiencia para 50 y 60 Hz y estipula, en todo el mundo, qué motores están contemplados y qué excepciones se aplican. Existente 3 clases de eficiencia para 50 y 60 Hz para motores de inducción.

- **IE1:** eficiencia estándar (equiparable to eff2)
- **IE2:** alta eficiencia (equiparable to eff1 or EPAAct'92)
- **IE3:** eficiencia premium (equiparable to EPAAct'05)

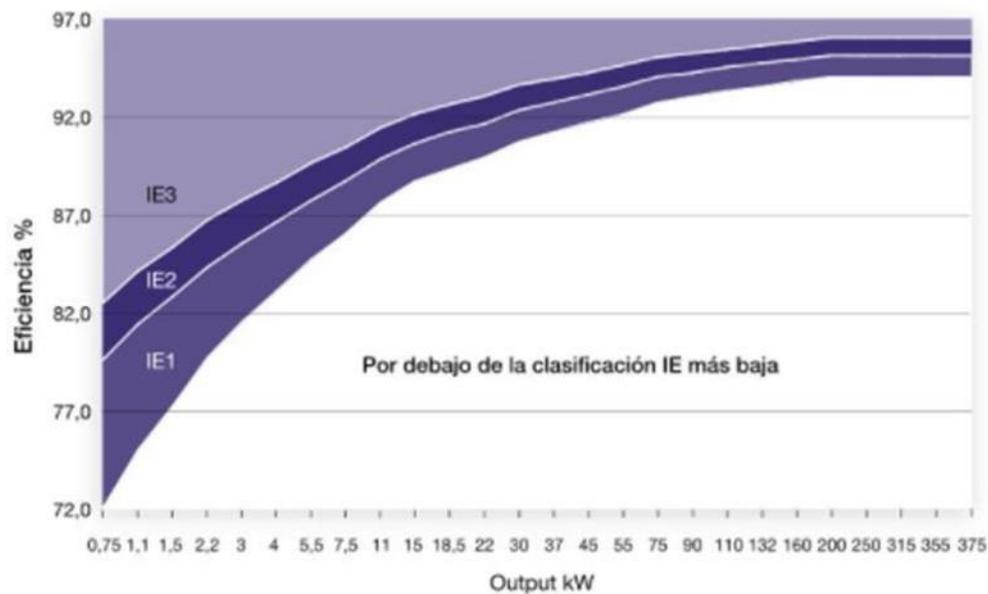


Figura 2. Grafica eficiencia energética entre los tipos de motores de inducción

Fuente: roydisa.es

En Colombia la mayoría de la industria utiliza motores de tipo IE1, los cuales son obsoletos y no muestran una eficiencia óptima frente al consumo energético.

La IEC 60034-30 10 2008 define tres clases de eficiencia IE (Eficiencia Internacional) para los motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos y única velocidad.

- IE1 = Eficiencia estándar (niveles de eficiencia más o menos equivalentes a ACT2 en Europa hoy en día)
- IE2 = Alta eficiencia (niveles de eficiencia más o menos equivalentes a ACT1 en la Europa actual e idéntica a EPAct en los EE.UU. para 60 Hz)
- IE3 = Eficiencia Premium (nueva clase de eficiencia en la Europa actual e idéntica a "NEMA Premium", en el Estados Unidos por 60 Hz)

Los niveles de eficiencia definidos en la norma IEC 60034-30 se basan en los métodos de prueba especificados en la norma IEC 60034-2-1.2007. En comparación con las clases de eficiencia de edad, de acuerdo con el acuerdo CEMEP, el alcance se ha ampliado.

IEC 60034-30 cubre casi todos los tipos de motores (, zona peligrosa estándar, el puerto deportivo, la auto frenado):

- Velocidad individual, trifásico, 50 y 60 Hz
- 2, 4 o 6 polos
- Potencia nominal de salida desde 0,75 hasta 375 kW
- Tensión nominal de hasta 1000 V

4.7.2 Artículo 12. Motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla para 60 Hz

El artículo 12 del reglamento técnico de etiquetado RETIQ, permite establecer en la placa de motores eléctricos trifásicos la eficiencia, definida como la potencia mecánica de salida sobre la potencia eléctrica de entrada expresada en %, así como el consumo diario de energía expresado en KWh. Por lo cual se establece los valores en eficiencia nominal.

4.7.2.1 Eficiencias mínimas para comercialización

Bajo ninguna circunstancia se puede comercializar motores trifásicos relacionados en el artículo 12 del RETIQ con una eficiencia inferior al 50%, se relacionan las tablas de eficiencia de acuerdo a la clasificación del motor (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Tabla 3.

Límite inferior nominal para Eficiencia Super Premium (IE4) (%) 60Hz

Potencia Nominal (kW)	Número de polos			
	2	4	6	8
5,5	90,2	92,4	91,7	88,5
7,5	91,7	92,4	92,4	91,0

Potencia Nominal	Número de polos				
	(kW)	2	4	6	8
11		92,4	93,6	93,0	91,0
15		92,4	94,1	93,0	91,7
18,5		93,0	94,5	94,1	91,7
22		93,0	94,5	94,1	93,0
30		93,6	95,0	95,0	93,0
37		94,1	95,4	95,0	93,6
45		94,5	95,4	95,4	93,6
55		94,5	95,8	95,4	94,5
75		95,0	96,2	95,8	94,5
90		95,4	96,2	95,8	95,0
110		95,4	96,2	96,2	95,0
150		95,8	96,5	96,2	95,4
185		96,2	96,5	96,2	95,4
220		96,2	96,8	96,5	95,4
250 hasta 375		96,2	96,8	96,5	95,8

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2015)

Tabla 4.

Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE3) (%) 60Hz.

Potencia Nominal	Número de polos				
	kW	2	4	6	8
0,18		65,6	69,5	67,5	64,0
0,25		69,5	73,4	71,4	68,0
0,37		73,4	78,2	75,3	72,0
0,55		76,8	81,1	81,7	74,0
0,75		77,0	83,5	82,5	75,5
1,1		84,0	86,5	87,5	78,5
1,5		85,5	86,5	88,5	84,0

Potencia Nominal	Número de polos			
kW	2	4	6	8
2,2	86,5	89,5	89,5	85,5
3,7	88,5	89,5	89,5	86,5
5,5	89,5	91,7	91,0	86,5
7,5	90,2	91,7	91,0	89,5
11	91,0	92,4	91,7	89,5
15	91,0	93,0	91,7	90,2
18,5	91,7	93,6	93,0	90,2
22	91,7	93,6	93,0	91,7
30	92,4	94,1	94,1	91,7
37	93,0	94,5	94,1	92,4
45	93,6	95,0	94,5	92,4
55	93,6	95,4	94,5	93,6
75	94,1	95,4	95,0	93,6
90	95,0	95,4	95,0	94,1
110	95,0	95,8	95,8	94,1
150	95,4	96,2	95,8	94,5
185 hasta 375	95,8	96,2	95,8	95,0

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2015)

Tabla 5.

Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE2) (%) 60Hz.

Potencia nominal	Número de polos			
kW	2	4	6	8
0,18	64,0	68,0	55,0	50,0
0,25	68,0	70,0	59,5	52,0
kW	2	4	6	8
0,37	72,0	72,0	64,0	58,0
0,55	74,0	75,5	68,0	62,0

Potencia nominal	Número de polos			
	kW	2	4	6
0,75	75,5	78,0	73,0	66,0
1,1	82,5	84,0	85,5	75,5
1,5	84,0	84,0	86,5	82,5
2,2	85,5	87,5	87,5	84,0
3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
5,5	88,5	89,5	89,5	85,5
7,5	89,5	89,5	89,5	88,5
11	90,2	91,0	90,2	88,5
15	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
22	91,0	92,4	91,7	91,0
30	91,7	93,0	93,0	91,0
37	92,4	93,0	93,0	91,7
45	93,0	93,6	93,6	91,7
55	93,0	94,1	93,6	93,0
75	93,6	94,5	94,1	93,0
90	94,5	94,5	94,1	93,6
110	94,5	95,0	95,0	93,6
150	95,0	95,0	95,0	93,6
185	95,4	95,0	95,0	93,6
220 hasta 375	95,4	95,8	95	93,6
375	95,4	95,8	95,0	94,1

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2015)

Tabla 6.

Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE1) (%) 60Hz.

Potencia nominal	Número de polos				
	kW	2	4	6	8
0,18		62,0	66,0	52,5	50,0
0,25		64,0	68,0	57,5	50,5
0,37		70,0	70,0	62,0	57,5
0,55		72,0	74,0	66,0	59,5
0,75		74,0	77,0	72,0	64,0
1,1		78,5	79,0	75,0	73,5
1,5		81,0	81,5	77,0	77,0
2,2		81,5	83,0	78,5	78,0
3,7		84,5	85,0	83,5	80,0
5,5		86,0	87,0	85,0	84,0
7,5		87,5	87,5	86,0	85,0
11		87,5	88,5	89,0	87,5
15		88,5	89,5	89,5	88,5
18,5		89,5	90,5	90,2	88,5
22		89,5	91,0	91,0	90,2
30		90,2	91,7	91,7	90,2
37		91,5	92,4	91,7	91,0
45		91,7	93,0	91,7	91,0
55		92,4	93,0	92,1	91,5
75		93,0	93,2	93,0	92,0
90		93,0	93,2	93,0	92,5
110		93,0	93,5	94,1	92,5
150		94,1	94,5	94,1	92,5
185 hasta 375		94,1	94,5	94,1	95,5

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2015)

5 Metodología

A continuación se presenta, la metodología que se aplicará para el desarrollo del proyecto.

5.1 Tipo de Proyecto

El proyecto se va a trabajar mediante la investigación aplicada, la cual permite resolver problemas específicos como la reducción del consumo energético de motores AC.

5.1.1 Investigación descriptiva y aplicada.

Este proyecto plantea una posible solución al mejoramiento del problema planteado en este documento, por medio de una sustentación teórica y práctica. El proyecto se va a trabajar mediante la investigación aplicada, la cual permite resolver problemas específicos, en este caso la reducción del consumo energético de motores AC.

5.1.2 Método

Para este proyecto se tendrán en cuenta todas las especificaciones eléctricas y normativas vigentes que, al optimizar prácticas, estandarizar los procesos y la recopilación de información ayudarán al desarrollo de la propuesta.

Con el objetivo de entender el desarrollo del proyecto, se realizará un plan de trabajo dividido en 4 fases que permitan comprender de manera más sencilla las diferentes actividades que se ejecutaran.

- **FASE 1:** En esta fase se va a realizar una revisión bibliográfica la cual va a suministrar una información real y consistente, esta va a brindar un conocimiento para determinar las falencias que se encuentran frente al ahorro energético en los motores AC.

- **FASE 2:** Identificar comportamientos energéticos a través de estudios estadísticos, gráficas comparativas de motores AC de baja y alta eficiencia y realizar pruebas de laboratorio para analizar sus consumos y evaluar las pérdidas energéticas en estos motores.
- **FASE 3:** Implementar medidas de ahorro energético en motores AC, por medio de arrancadores suaves y variadores de velocidad, para así obtener un estudio en el cual se pueda comprobar que, al desarrollar mejoras en los equipos eléctricos, se obtiene como resultado un ahorro energético considerable; esto lleva a contribuir con el medio ambiente y obtener ahorros económicos.
- **FASE 4:** Dar a conocer el proyecto en el sector industrial ya que tiene la más alta demanda de energía primaria y de este modo, el más alto potencial para el ahorro y conservación energética a través de medidas económicas y técnicas, así mismo motivar e incentivar a las industrias a aplicar este proyecto y lo vuelvan una práctica cotidiana.

5.2 Instrumentos de recolección de información

5.2.1 Fuentes primarias

Se obtendrá información de documentos oficiales, estudios realizados en la aplicación de este tipo de motores, principalmente sitios web.

5.2.2 Fuentes secundarias.

Se realizará análisis de documentos encontrados en repositorios institucionales, libros de ingeniería eléctrica, aplicaciones de ahorro energético, proyectos realizados por empresas del sector industrial.

6 Resultados del proyecto

A continuación se presenta los resultados obtenidos en el proyecto como las pruebas realizadas con los motores y los equipos de arranque (variador de frecuencia y arrancador estrella-delta).

6.1 Lugar de la primera prueba: Yarumal, Antioquia

El día 5 marzo de 2021, se eligió como lugar de inspección para la primera prueba, la empresa Talcos de Yarumal S.A. ubicada en la ciudad de Yarumal (Antioquia), que por las características del trabajo que allí se realizan, es ideal para esta propuesta de mejora.

La empresa cuenta con un molino triturador de piedras, esta máquina tiene un motor de 60 HP que trabaja con un voltaje de 440 V y un amperaje de 73 A, además posee un motorreductor industrial SK7072 marca NORD acoplado. El molino tiene capacidad para 2 toneladas de carga, trabaja 24 horas al día con un ciclo paro arranque de 4 horas para la llenada del tambor con el material.



Figura 4. Placa de características molino de piedras

Fuente: Autoría propia



Figura 5. Caja de conexión molino de piedra

Fuente: Autoría propia



Figura 6. Acople molino de piedras

Fuente: Autoría propia

6.1.1 Equipos requeridos para la prueba

Se empleó para la toma de las medidas el analizador de redes AEMC 3945 el cual mide voltajes RMS de hasta 480 V (fase a neutro) o 830V (fase a fase) para sistemas de dos tres o

cuatro hilos, este analizador también mide corrientes RMS de hasta 6500 Arms, lo cual lo hace una herramienta ideal de medida.

También se cuenta con un variador electrónico de frecuencia Yaskawa A1000 modelo F74075 con características tales como control vectorial de lazo cerrado, torque de arranque de 200% a 0Hz además de capacidad de sobrecarga de 150% por un minuto (trabajo pesado) y 120% durante un minuto (trabajo normal) entre otras características.



Figura 7. Estructura exterior variador de frecuencia Yaskawa

Fuente: Autoría propia



Figura 8. Tablero de control variador de frecuencia Yaskawa

Fuente: Autoría propia

6.1.2 Procedimiento

Con esta prueba se pretende comparar los picos de corriente y el funcionamiento del motor del molino de piedras, arrancándolo directamente con un breaker vs el arranque y operación con variador de frecuencia.

Se realizarán dos medidas utilizando analizador de redes AEMC 3945 la primera de ellas con arranque directo y la segunda medición con arranque y operación del motor del molino de piedras con variador electrónico de frecuencia Yaskawa modelo F74075. Ambas mediciones se realizaron durante un periodo de 15 minutos con el fin de realizar varios arranques y poder registrar los picos de corriente en cada uno de ellos. Estas medidas se realizaron con el molino cargado.

Para la Medición número 1 en la cual el arranque y operación del motor del molino de piedra esta con sistema de operación en directo, el analizador de red arroja la siguiente gráfica:

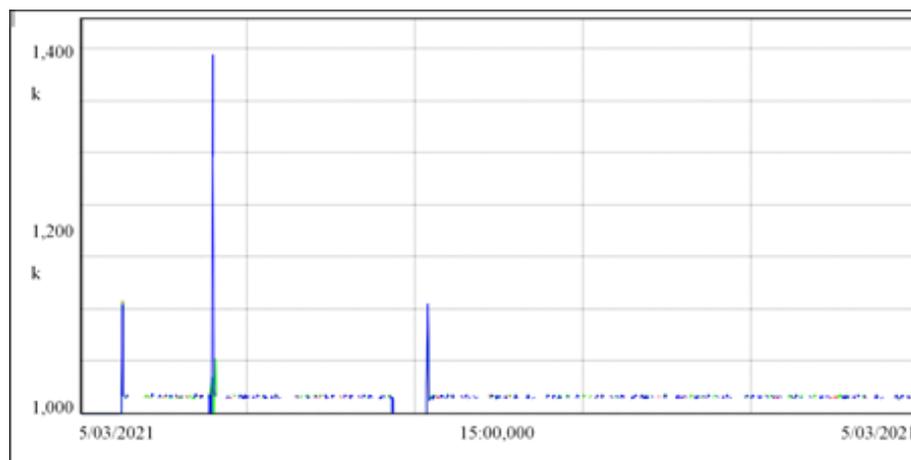


Figura 9. Picos de corriente en sistema de operación en arranque directo

Fuente: Autoría propia.

Se observa en la gráfica que aparecen tres picos de corriente en el arranque y estos valores reflejados representan el amperaje por cada fase, que es el valor RMS de la gráfica en un lapso de 15 minutos, en intervalos de 3 minutos, tiempo en el cual se realizó la medición. Se evidencia

en la gráfica un primer pico 0.429 KA en el primer intervalo, un segundo pico de 1,379 KA en el mismo intervalo y por último un tercer pico de 0.428 KA, para luego estabilizarse en la corriente nominal del motor 73 A.

Los valores registrados por el analizador de red se expresan en la siguiente tabla en donde se especifica por cada fase su consumo de menor a mayor.

Tabla 7.

Consumo en arranque directo por cada valor RMS

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 RMS	5/03/2021	3:20.00.000 p.m.	64,920	0,000	429,000	A	15:00	(min: s)
A2 RMS	5/03/2021	3:20.00.000 p.m.	65,654	0,000	428,500	A	15:00	(min: s)
A3 RMS	5/03/2021	3:20.00.000 p.m.	0,085	0,000	1,379	k A	15:00	(min: s)

Fuente: Autoría propia

La medición número 2 con arranque y operación del motor del molino de piedras con variador eléctrico de frecuencia Yaskawa modelo F74075, configurado con una rampa de aceleración de 15 segundos, se obtiene la siguiente grafica del analizador de red.

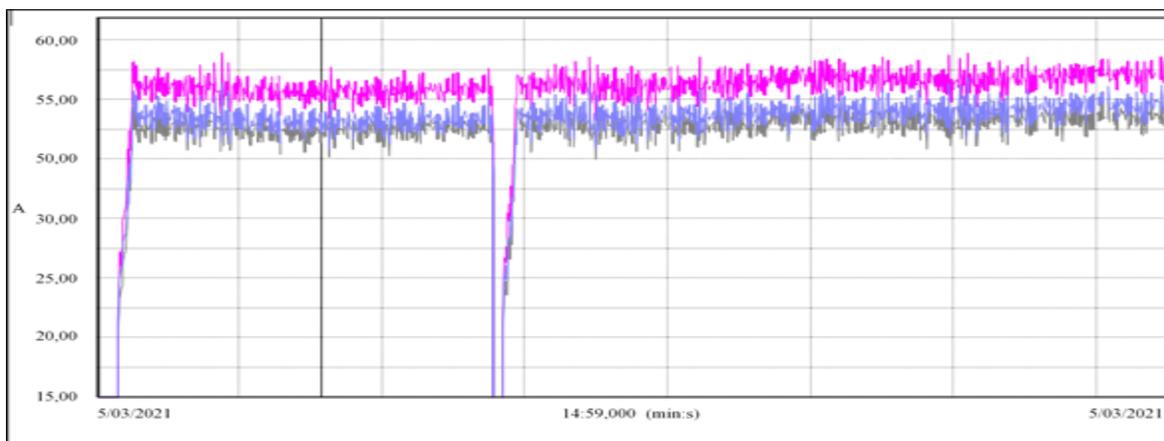


Figura 10. Picos de corriente en sistema de operación en arranque con variador de frecuencia

Fuente: Autoría propia

Tabla 8.

Consumo en arranque con variador de frecuencia por cada valor RMS

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 RMS	5/03/2021	4:50.00.000 p.m.	44,853	0,000	51,400	A	15:00	(min:s)
A2 RMS	5/03/2021	4:50.00.000 p.m.	51,502	0,000	58,000	A	15:00	(min:s)
A3 RMS	5/03/2021	4:50.00.000 p.m.	46,515	0,000	53,600	A	15:00	(min:s)

Fuente: Autoría propia

6.2 Lugar de la segunda prueba: Envigado, Antioquia

La segunda prueba del proyecto se realizó el miércoles 24 de marzo de 2021. El lugar donde se realizó las mediciones fue en la empresa Industria Jabonera La Jirafa, ubicada en el municipio de Envigado (Antioquia).

La máquina en la que se realizó la prueba es una extrusora que cuenta con un acople a una polea; en el centro tiene un embrague, el cual también se conecta a otra polea que mueve un tornillo sin fin que socaba el jabón y lo vierten en una tolva para después transportarlo al área de embasamiento.

Tiene un motor DN 160 L-4 de la empresa Aguirena Motores, este tiene 20 HP, trabaja con una tensión 220 / 380 V, ya que trabaja con conexión estrella delta y una corriente nominal de 53.5 / 31 A. Además de esto tiene capacidad de carga de 650-700 Kg de carga, opera 24 horas al día, 6 días a la semana con un ciclo de arranque-paro de 8 horas para el llenado de la tolva con el jabón.



Figura 11. Placa de características de la maquina extrusora

Fuente: Autoría propia.



Figura 12. Motor tornillo Sin fin 1

Fuente: Autoría propia.



Figura 13. Motor tornillo Sin fin 2

Fuente: Autoría propia.

6.2.1 Equipos para prueba

Para la toma de las medidas se empleó la pinza amperimétrica Unit UT 203 la cual mide corriente alterna de hasta 400 A y tensión hasta 600 V. La pinza también tiene la opción retención de datos por medio de la tecla hold, en el cual se puede congelar la medición que aparece en la pantalla para tomar datos o realizar alguna comprobación, esta función es ideal para este tipo de pruebas.



Figura 14. Equipo de medida pinza amperimétrica Unit UT 203

Fuente: Autoría propia

El sistema de arranque estrella delta está constituido de 3 contactores marca Siemens Sirius, un relé térmico 20/32 amperios regulado a 22 A marca Siemens. Temporizador Lovato BT20 a la conexión regulado a los 10 segundos, además de que cada contactor tiene un bloque auxiliar de control L0050905.



Figura 15. Arrancador estrella – delta del motor.

Fuente: Autoría propia.

6.2.2 Procedimiento

Con esta prueba se pretende comparar los picos de corriente y el funcionamiento del motor de la maquina extrusora, arrancándolo directamente con un breaker vs el arranque y operación en estrella - delta.

Se realizarán dos medidas utilizando la pinza amperimétrica Unit UT 203, la primera de ellas con arranque directo y la segunda medición con arranque y operación del motor de la maquina extrusora con el arrancador estrella delta. Ambas mediciones se realizaron durante un periodo de 30 segundos con el fin poder registrar los picos de corriente en cada uno de ellos. Estas medidas se realizaron con la maquina sin material, debido a que la tolva no se podía utilizar porque se le estaba haciendo mantenimiento.

6.2.2.1 Arranque directo

Para la primera medición, el arranque y operación del motor de la maquina extrusora con sistema de operación en directo, se obtienen los siguientes datos contrastados en la siguiente gráfica corriente vs tiempo:

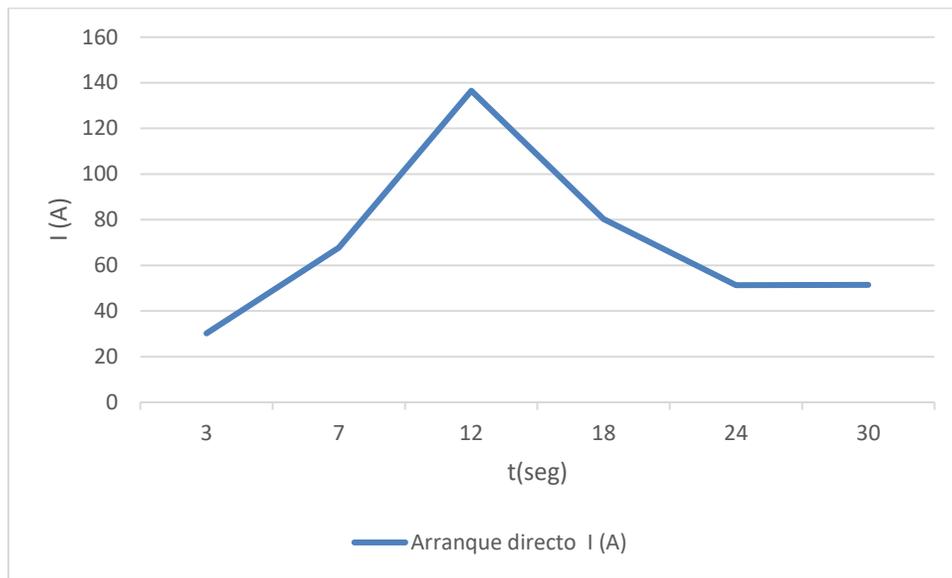


Figura 16. Grafica del arranque directo corriente vs tiempo

Fuente: Autoría propia

La grafica permite observar que dentro de un periodo de 30 segundos, hay un pico máximo de corriente de 136,51 A después del arranque en el segundo 12, luego de esto, estabiliza en el segundo 24 a la corriente nominal de 17 A.

Tabla 9.

Corriente en el arranque directo, tomada en función del tiempo.

Arranque directo	
I (A)	t(segundos)
30,2	3
67,8	7
136,51	12
80,3	18
51,3	24
51,5	30

Fuente: Autoría propia

6.2.2.2 Arranque estrella delta

Para la Medición número 2 con el temporizador y arrancador estrella delta del motor de la maquina extrusora, se obtienen los siguientes datos contrastados en la siguiente gráfica corriente vs tiempo:

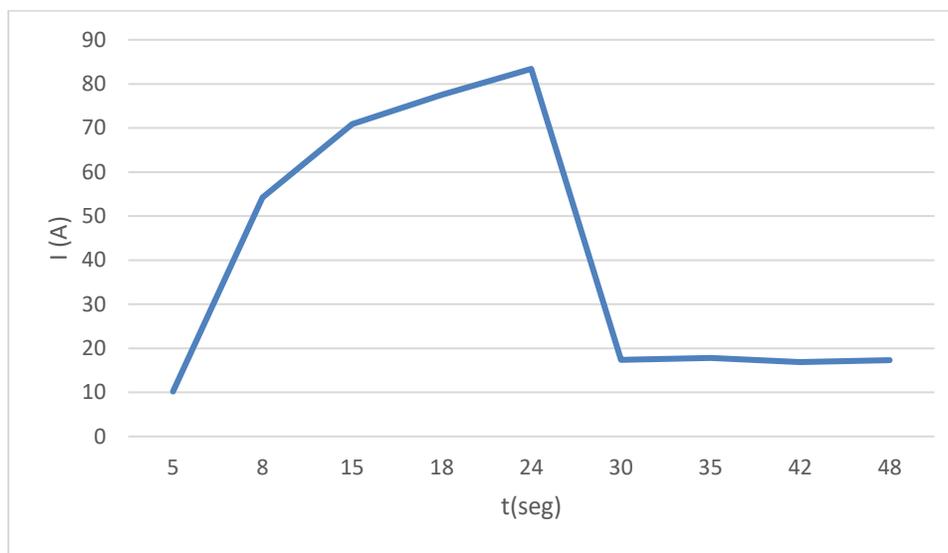


Figura 17. Grafica del arranque estrella delta corriente vs tiempo

Fuente: Autoría propia

En la gráfica se puede evidenciar que durante el arranque estrella delta, en el segundo 24 se registra el pico máximo de corriente de 83 A, para luego estabilizarse en el segundo 30 en 17 A.

Tabla 10.

Corriente en el arranque estrella delta, tomada en función del tiempo.

Arranque Estrella Delta	
I (A)	t(segundos)
10,2	5
54,2	8
70,9	15
77,5	18
83,4	24

Arranque Estrella Delta	
I (A)	t(segundos)
17,4	30
17,8	35
16,9	42
17,3	48

Fuente: Autoría propia.

6.3 Publicación de resultados

El resumen de los resultados de las pruebas realizadas y el detalle de estas, se publicaron en un blog, esto con el fin de presentar los hallazgos encontrados y que nuestro proyecto de investigación permita al lector tener una visión más clara del funcionamiento de estos equipos de arranque en las máquinas de inducción AC y que permita para sus empresas, elegir la opción más adecuada para su operación.

El enlace es <https://implementaciondeahorro.blogspot.com/2021/04/implementacion-de-ahorro-energetico-en.html>

7 Conclusiones

- Según las gráficas obtenidas de la medición inicial de la primera prueba de arranque directo del motor del molino triturador de piedras, sección 6.1, figura 9, permite evidenciar que hay elevados picos en la corriente de arranque del motor de hasta 1,379 kA, siendo la corriente nominal de placa en la conexión que tiene es de 73 A, al compararlo con el variador de velocidad, lo que permite concluir que estos picos se presentan al accionar de manera directa desde el breaker, el arranque del motor. Por esto, los arranques directos también ocasionan el deterioro del sistema mecánico de la maquina (piñones, rodamientos acoples entre otros).
- Cómo se pudo observar en esta investigación (Ver Figura 10). Los picos de corriente en el sistema de operación durante el arranque con variador de frecuencia presenta bajo consumo de la corriente arranque y evidencia una tendencia constante en la misma, no presenta variaciones significativas que afecten el comportamiento del motor, por lo que se puede concluir que gracias a la rampa de aceleración con que el variador electrónico de frecuencia permite el arranque del motor y se eliminan los choques mecánicos de la maquina asociada a la parte mecánica del molino, por ende, se disminuye los daños mecánicos asociados a esta y los periodos entre mantenimientos programados.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la segunda medición de la prueba uno, sección 6.1, figura 10, la cual se realizó con el variador de frecuencia con un motor de conexión delta serie 12 terminales en operación con carga, no se evidencian picos elevados en la corriente de arranque, por lo que se puede deducir que como consecuencia de la utilización del variador electrónico de frecuencia, se elimina los picos de corriente en el arranque, debido a la rampa de aceleración del dispositivo. Entre más ciclos de arranque se realicen en un turno, mayor será el ahorro del consumo energético y la reducción de estrés mecánico.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en la segunda medición, sección 6.2, figura 16 y 17 y resultados de la tabla 10, en donde se muestra un bajo consumo de corriente en el arranque del arrancador estrella delta frente al arranque directo de la maquina extrusora de jabón, se puede inferir que por medio del arrancador estrella delta se evidencia una reducción de

corriente entre el 58% y 60 % de la corriente nominal. Este rango de ahorro depende de las características del motor, del uso y del ciclo de arranque -paro de la máquina. Para el objeto de estudio de este trabajo, la maquina extrusora solo tiene un ciclo de arranque paro (tiempo que transcurre entre el encendido de la maquina y apagado de la misma) de una vez a la semana lo cual es ideal para esta empresa porque el costo- beneficio es mayor debido a que la maquina solo se apaga una vez por semana para el mantenimiento.

- Según lo evidenciado en la primera prueba, sección 6.1, figura 10 y los resultados en la tabla 8, muestran los bajos consumos en la corriente de arranque al emplear el variador de velocidad, dan cuenta de un ahorro efectivo en el desempeño del motor del molino triturador de piedra. Por esta razón se puede concluir que gracias al variador de velocidad, el proceso permite disminuir la frecuencia de trabajo y por ende el ahorro será más notorio, ya que al bajar la velocidad de trabajo disminuye la corriente.
- De acuerdo con lo presentado en este proyecto de grado, es parte fundamental del proceso, dar a conocer a la comunidad, los datos recopilados y resultados obtenidos durante el proceso de investigación, esto permite afirmar que por medio del empleo de medios digitales (blog, redes sociales), se puede llevar a más personas el resultado de los hallazgos encontrados en este proyecto. Permitiendo así que la comunidad tenga fácil acceso a la información aquí plasmada de una forma sencilla y clara, ya sea para que sirva como marco de referencia para futuros trabajos académicos, o para implementar mejoras de rendimiento en la industria.

8 Recomendaciones

Establecidas las conclusiones de esta investigación se recomienda:

- Debido a que la investigación permitió evidenciar que las pruebas con motores en vacío no tendrían escalas con valores amplios, lo que dificulta los análisis y evidenciar las bondades de operar con diferentes tipos de arranque., se recomienda realizar este tipo de pruebas con máquinas operando a plena carga donde se permita cotejar los resultados de manera eficiente y permita registrar las variables eléctricas en una escala amplia.
- Se evidencia en este proyecto que los datos obtenidos con instrumentos electrónicos de medida especializados, como el analizador de red Fluke, brindan lecturas de mayor precisión, de forma ágil y confiable, por esto se recomienda utilizar en proyectos similares equipos con la suficiente precisión y resolución, cuando se disponga de ellos.
- El empleo de blogs en la web es mecanismo de divulgación de información efectivo para transmitir y socializar información de investigaciones, llamado estrategia de marketing de contenido. Estas plataformas tienen mayor alcance de personas que otros medios impresos como folletos, periódicos, volantes entre otros. De acuerdo con lo anterior, se recomienda el uso de este medio para dar a conocer los resultados de los estudios similares, pruebas efectuadas durante otras investigaciones y fomentar de esta forma su socialización y aplicación en la industria.
- Existen otros tipos de sistemas de arranque para los motores AC, como el uso de autotransformadores , arranque por resistencias estáticas, entre otras, que aunque no fueron abordados en esta investigación, se puede recomendar para futuros proyectos de investigaciones y cotejar resultados.
- Se recomienda la utilización de arrancadores para disminuir el riesgo eléctrico al operario al accionar manualmente el arranque de las maquinas sin descartar los elementos de protección adecuados para la utilización de estas.

9 Referencias Bibliográficas

- Campos, J., Figueroa, E., Stand, L., Ospino, I., Navarro, A., Quispe, E., . . . Castrillon, R. (2021). *EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES ELÉCTRICOS*. Medellín: Unidad de Planeación Minero Energética.
- EL BLOG DE MR ELECTROMECAÁNICA. (09 de Agosto de 2010). *¿Por qué se dañan los motores de corriente alterna?* Obtenido de <http://mrelectromecanica.blogspot.com/2010/08/por-que-se-danan-los-motores-de.html>
- Iguren. (10 de Junio de 2015). *Aplicaciones y Usos de los variadores de frecuencia*. Obtenido de <https://iguren.es/blog/aplicaciones-y-usos-de-los-variadores-de-frecuencia/>
- Iguren. (02 de Marzo de 2015). *Cómo funciona un arrancador suave*. Obtenido de <https://iguren.es/blog/como-funciona-un-arrancador-suave/>
- Iguren. (12 de Septiembre de 2017). *¿Qué es y cómo funciona un Variador de Frecuencia?* Obtenido de <https://iguren.es/blog/como-funciona-un-variador-de-frecuencia/>
- meia, s. (Mayo de 2021). *Motor electrico*. Obtenido de <https://talleresmeia.com/motor-electrico>
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *ANEXO GENERAL REGLAMENTO TÉCNICO DE ETIQUETADO RETIQ*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Monografias. (08 de Marzo de 2021). *Motores Eléctricos*. Obtenido de Motores Eléctricos: <https://www.monografias.com/trabajos93/motores-electricos/motores-electricos.shtml>
- Motor electrico*. (2021). Obtenido de <https://talleresmeia.com/motor-electrico>
- Nuestra Esfera. (08 de Junio de 2014). *¿Por qué importa la eficiencia energética?* Obtenido de <http://nuestraesfera.cl/zoom/por-que-importa-la-eficiencia-energetica/>
- Peralta, G. (2009). *DIAGNOSTICO DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN*. Huancayo: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERU.
- Unidad de Planeacion Minero Energética. (17 de Diciembre de 2014). *DETERMINACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LOS SUBSECTORES MANUFACTUREROS CÓDIGOS CIU 19 A 31 EN COLOMBIA A*

PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO PARA SUS DIFERENTES PROCESOS, USOS Y EQUIPOS DE USO FINAL. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/DeterminacionEficiencia/Informe_Final_Volumen_2.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (Diciembre de 2016). *PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2017 - 2022.* Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (Julio de 2019). *PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA.* Obtenido de http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Jul_2019.pdf

Universia. (28 de Octubre de 2013). *Problemas energéticos en el sector industrial.* Obtenido de <https://www.universia.net/co/actualidad/orientacion-academica/problemas-energeticos-sector-industrial-1059465.html>

UPME, U. d. (Diciembre de 2016). *PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2017 - 2022 .* Obtenido de https://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf

10 Anexos

A continuación se presentan la lista de anexos del proyecto de grado.

Anexo 1. Manual analizador de redes AEMC 3945

Anexo 2. Manual variador Yaskawa A1000

Anexo 3. Manual Multímetro digital UT203